

홀로그래픽 저장장치를 위한 2차원 6/8 균형부호의 트렐리스 인코딩

김 병 선*, 이 재 진^o

Trellis Encoding of 6/8 Balanced Code for Holographic Data Storage Systems

Byungsun Kim*, Jaejin Lee^o

요 약

차세대 저장장치로 부각되고 있는 홀로그래픽 데이터 저장장치는 인접한 픽셀들 간의 이차원 인접 심볼간 간섭과 하나의 홀로그램 볼륨에 여러 페이지가 저장되면서 생기는 인접 페이지간 간섭과 같은 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 제거하기 위해 본 논문에서는 오류 정정이 가능한 2차원 6/8 균형부호를 이용한 트렐리스 인코딩 방법을 제안하였다. 제안된 변조 부호는 균형부호의 특징을 사용하여 IPI를 완화시키며 트렐리스 구조의 부호화를 통하여 에러 정정이 가능하게 하였다. 제안된 코드는 SNR이 높아짐에 따라 일반적인 6/8 균형부호보다 더 좋은 성능을 보였다.

Key Words : Holographic data storage, Two-dimensional intersymbol interference, Interpage interference

ABSTRACT

Holographic data storage is a strong contender to become the next-generation data storage method. Its major weaknesses are two-dimensional intersymbol interference between neighboring pixels and interpage interference caused by storing multiple pages in a single volume of hologram. In this paper, we present a trellis encoding scheme of 6/8 balanced modulation code, to address the two weaknesses. The proposed modulation coding scheme captures on characteristics of the balanced code: the scheme relaxes IPI and enables error correction by exploiting the trellis structure. The proposed method showed improved SNR over the conventional 6/8 modulation code.

I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장장치 (holographic data storage, HDS)는 고도 정보화 시대에 정보 저장장치가 필요한 세 가지 핵심적인 특징을 갖추고 있어 차세대 대용량 정보 저장장치로 각광을 받고 있다. 세 가

지 핵심적인 특징은 대용량화, 정보 입출력속도의 고속화, 짧은 정보 접근시간이다. HDS는 표면에 정보를 저장하던 방식의 저장장치와는 다르게 저장 매질의 체적에 정보를 저장한다는 특징이 있다. 동일한 공간에 빛의 회절 특성을 이용하여 여러 페이지의 정보를 저장하기 때문에 저장용량이 증가한다. 그리고 charge-

* 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2059077).

• First Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, kimbs@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-09-360, Received September 25, 2014; Revised October 1, 2014; Accepted October 1, 2014

coupled devices (CCD)를 이용한 병렬 신호처리 방식을 사용함으로써 정보 전송률을 고속화 시킬 수 있으며, 정보 접근 시간도 수십초 수준으로 매우 빠르게 구현이 가능하다¹⁻³⁾.

기존에 오류가 생기는 주원인은 줄 단위로 정보를 읽고 쓰면서 생기는 인접 심볼간 간섭 (Intersymbol interference, ISI)이었다. 하지만 HDS에는 페이지 단위로 정보를 읽고 쓰기 때문에 기존과는 다르게 ISI가 2차원으로 발생한다. 그렇기 때문에 기존의 저장장치에서는 앞과 뒤의 정보만 생각하면 되었지만 HDS는 앞과 뒤의 정보뿐만 아니라 위와 아래의 정보도 고려 해주어야 한다. 또한 HDS는 매질의 체적에 페이지 단위로 정보를 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭 (Interpage interference, IPI) 또한 발생한다. 정보의 저장 용량을 늘리기 위해서는 한 비트가 차지하는 공간이 작아져야만 하고 한 페이지에 저장되는 데이터가 많아지면 2차원 ISI는 더 심해진다. 마찬가지로 동일한 공간에 저장하는 페이지를 늘리는 방법으로 저장 용량을 늘리게 되면 IPI가 심해진다⁴⁻⁶⁾.

이러한 2차원 ISI를 제거하기 위한 방법으로 두 가지 측면의 연구가 진행되어 왔다. 첫 번째는 기존의 1차원 ISI를 완화시키는 방법인 부분응답 최대유사도 (partial response maximum likelihood, PRML) 방법을 2차원으로 적용시키는 방법이다. 두 번째는 저역

통과 필터링 효과를 고려하는 방법이다. 저역 통과 필터의 특성을 갖는 변조 부호를 사용하는 것으로 2차원 ISI를 줄이는 방법에 대한 연구들이 많이 진행되어 왔다⁷⁻¹¹⁾.

IPI는 페이지 내에서 “0”과 “1” 픽셀의 수를 동일하게 함으로써 완화시킬 수 있다. HDS는 빛의 양으로 기록되기 때문에, 각각의 기록 페이지에 발생하는 빛의 양이 비슷하다면 신호빔의 강도(intensity)에 의한 변화가 적어진다. 그렇기 때문에 기록조건이 유사하게 되고, 재생 또한 유리하게 된다. 본 논문에서는 IPI를 완화시키기 위해 기존에 제안되었던 오류 정정 6/8 변조 부호 방법에 기록 페이지 내의 “0”과 “1” 픽셀의 수가 동일한 balanced 변조 부호를 적용하였다.

II. 6/8 균형부호의 트렐리스 인코딩

2.1 균형부호

IPI를 완화시키기 위한 방법으로 표 1과 같이 부호율이 6/8인 64개의 코드워드를 제안하였다. 표에서 볼 수 있듯이 이 코드워드들은 “0”과 “1”의 개수가 각각 4개씩 동일함을 알 수 있다. 본 코드워드는 페이지에 4×2 행렬에 왼쪽에서 오른쪽으로 위에서 아래 방향으로 순서대로 들어간다. 따라서 이 코드워드들로 만들어진 전체 1024×1024 크기의 한 페이지는 0과 1의 개

Table 1. Proposed 6/8 balanced codewords

Codeword Number	symbol	Codeword Number	symbol	Codeword Number	symbol	Codeword Number	symbol
0	00001111	16	01001011	32	11110000	48	10110100
1	00010111	17	01110100	33	11101000	49	10001011
2	00101011	18	01111000	34	11010100	50	10000111
3	00110011	19	00011011	35	11001100	51	11100100
4	00110101	20	00100111	36	11001010	52	11011000
5	00111010	21	01001101	37	11000101	53	10110010
6	00111100	22	01001110	38	11000011	54	10110001
7	01010011	23	01010110	39	10101100	55	10101001
8	01010101	24	01101010	40	10101010	56	10010101
9	01011010	25	01110001	41	10100101	57	10001110
10	01011100	26	01110010	42	10100011	58	10001101
11	00011101	27	00110110	43	11100010	59	11001001
12	00011110	28	00111001	44	11100001	60	11000110
13	00101101	29	01100011	45	11010010	61	10011010
14	00101110	30	01101100	46	11010001	62	10010011
15	01000111	31	01101001	47	10111000	63	10010110

수가 동일하게 되며, 이들의 분포도 일부분에 치우치지 않고 전체 페이지에서 골고루 0과 1이 분포하게 되어 IPI를 완화시킬 수 있게 된다. 또한 제안된 균형부호는 최소거리가 2이므로, 트렐리스 구조의 인코딩 방법을 적용하면 오류정정이 가능하게 된다^[10].

2.2 변조 및 복호 방법

이 변조 부호는 32개의 상태를 가진다. 64개의 코드워드를 32개의 상태에 매핑 시키기 위해 그림 1과 같이 각각의 상태에서 가지 값들에 코드워드를 할당한다. 각각의 괄호 안에 있는 숫자는 각각의 가지에 할당되는 값을 말한다. 그림과 같이 왼쪽 가로안의 숫자는 위쪽의 가지에 오른쪽의 가로안의 숫자는 아래쪽에 할당되어진다. 전체 구조에서 살펴보면 가장 위의 상태 (0번째)에서는 각각의 가지마다 위에서부터 (0, 32), (1, 33), (2, 34), ..., (29, 61), (30, 62), (31, 63)이 할당된다. 그리고 k 번째 상태에서는 (k, k+32), (k+1, k+33), (k+2, k+34), ..., (k-3, k+29), (k-2, k+30), (k-1, k+31)이 할당된다. 같은 가지에 할당되는 두 개의 코드워드는 성능 향상을 위해 해밍거리가 4보다 크거나 같은 코드워드들끼리 짝지었다.

표 2는 이러한 변조 방식의 규칙을 정리하였다. 입력받는 6비트 중 5비트는 다음 상태를 결정짓게 되고, 마지막 1비트는 해당 상태에서 첫 번째 가지의 값인지, 두 번째 가지의 값인지를 결정하게 된다. 제안된 트렐리스 인코딩 방법은 항상 초기상태 (S₀)에서 시작해 6비트의 입력 데이터가 들어오면 출력 코드워드를 결정한 후 다음 상태로 이동한다. 그리고 그 다음

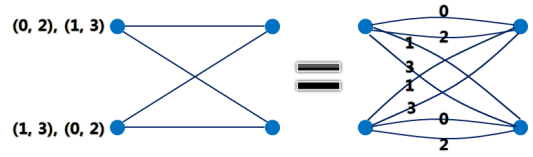


Fig. 1. Example of codeword assignment to branches

6비트의 입력 데이터가 들어오면 진행된 현재 상태에서 출력 코드워드를 결정한 후 그 다음 상태로 이동한다. 이러한 과정을 계속 반복하여 m번째에서 초기 상태 S₀로 돌아오고, 전체 과정을 입력 데이터가 소진될 때까지 반복하여 진행한다. 표 3은 이러한 변조 과정의 예시이다.

복호 과정에서는 비터비 알고리즘이 사용된다. 현재 상태와 다음 상태의 거리를 나타내는 가지 메트릭 (branch metric)을 아래 식 (1)과 같이 계산한다.

$$\lambda_1(S_a, S_b) = \sum_{j=1}^8 [z_{ji} - u_{ji}^k(S_a)]^2 \quad (1)$$

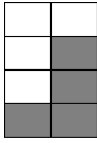
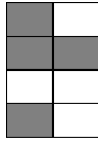
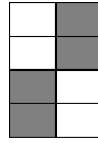
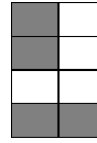
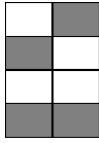
위 식 (1)에서 S_a는 현재 상태이고 S_b는 다음 상태를 의미한다. 그리고 z_{ji}는 i번째 수신된 코드워드의 j번째 비트값이고, u_{jk}^(k)는 i번째로 예상되는 코드워드의 j번째 비트값이다. 각각의 상태에서 계산된 가지 값이 가장 작은 가지가 생존경로로 결정되며, 이러한 과정을 m번 반복 후 상태는 S₀에 도착하게 되면 가지의 값의 합이 가장 작은 경로가 정답으로 선택되어 복호한다.

Table 2. Encoding rule of the proposed trellis modulation scheme

Input	S ₀		S ₁		S ₂		...	S ₂₉		S ₃₀		S ₃₁	
	o.c	n.s.	o.c	n.s.	o.c	n.s.		o.c	n.s.	o.c	n.s.	o.c	n.s.
000000	0	S ₀	1	S ₀	2	S ₀	...	29	S ₀	30	S ₀	31	S ₀
000001	32	S ₀	33	S ₀	34	S ₀	...	63	S ₀	63	S ₀	63	S ₀
000010	1	S ₁	2	S ₁	3	S ₁	...	30	S ₁	31	S ₁	0	S ₁
000011	33	S ₁	34	S ₁	35	S ₁	...	62	S ₁	63	S ₁	32	S ₁
000100	2	S ₂	3	S ₂	4	S ₂	...	31	S ₂	0	S ₂	1	S ₂
⋮			⋮				...			⋮			
111011	61	S ₂₉	62	S ₂₉	63	S ₂₉	...	58	S ₂₉	59	S ₂₉	60	S ₂₉
111100	30	S ₃₀	31	S ₃₀	0	S ₃₀	...	27	S ₃₀	28	S ₃₀	29	S ₃₀
111101	62	S ₃₀	63	S ₃₀	32	S ₃₀	...	59	S ₃₀	60	S ₃₀	61	S ₃₀
111110	31	S ₃₁	0	S ₃₁	1	S ₃₁	...	28	S ₃₁	29	S ₃₁	30	S ₃₁
111111	63	S ₃₁	32	S ₃₁	33	S ₃₁	...	60	S ₃₁	63	S ₃₁	62	S ₃₁

o.c. : output codeword, n.s. : next state

Table 3. An example of encoding procedure

	1-st	2-nd	3-rd	4-th	...	m-th
Input data	000 010	010 001	101 011	100 110	...	000 000
					...	
Current state	State 0	State 1	State 20	State 21	...	State 29
Next state	State 1	State 20	State 21	State 23	...	State 0
Output codeword	Symbol 1	Symbol 53	Symbol 9	Symbol 42	...	Symbol 29

III. 시뮬레이션 및 결과

제안된 변조 부호의 성능을 확인하기 위해 HDS 채널 모델을 구현하여 시뮬레이션 하였다⁸⁻¹⁰. 본 실험에서는 한 페이지의 크기가 1024×1024인 페이지를 총 1000페이지 실험하여 데이터를 얻었으며, 실험에서 사용된 블러(blur)값은 1.85로 고정하였다. 신호대 잡음비 (Signal-to- Noise Ratio, SNR)를 위하여 적용된 잡음은 부가백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)이다.

3.1 시뮬레이션 결과

그림 2는 제안된 트렐리스 변조 방식이 처음 초기 상태 S_0 에서 시작하여 다시 S_0 로 돌아올 때까지의 길이 m 이 각각 30, 100, 500, 1000일 때의 성능을 비교한 결과이다. 여기서 m 의 값이 커진다는 것은 한 페이지를 봤을 때 S_0 로 돌아오기 위한 값이 $m=30$ 일 때는 30 심볼 당 한 번씩이지만, $m=1000$ 일 때는 1000 심볼마다 한 번씩이기 때문에, 결국 부호율이 조금 더 높아짐을 의미한다. 비트오류율 (Bit Error Rate,

BER)이 10^{-4} 일 때 성능을 비교해 보면, $m=30$ 인 경우가 $m=100$ 보다는 1dB 만큼, $m=500$ 일 때 보다는 2.2dB 만큼, m 이 1000일 때 보다는 2.8dB 만큼 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 그리고 일반적인 6/8 균형부호와 비교하면 1.5dB 만큼의 성능 이득을 갖게 된다. 또한 m 이 100일 때 SNR이 13.5dB 이하에서는 일반적인 6/8 균형부호가 더 좋은 성능을 보이고, 그 이상인 경우에만 제안된 인코딩 방법이 더 좋은 성능을 보인다. 그 이유는 제안된 방법의 복호과정에서 사용된 트렐리스 구조의 오류전파 (error propagation) 성질 때문이다.

그림 3은 $m=100$ 일 때, 블러값이 달라지는 경우의 성능을 비교해 보았다. 블러값이 1.9 이하일 때는 제안된 인코딩 방법의 성능이 더 좋게 나오는 것을 볼 수 있다. 하지만 1.9 이상이 되면서부터 일반적인 6/8의 성능이 더 좋게 나오는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 앞의 경우와 마찬가지로 채널 상황이 열악해지면서 생기는 트렐리스 구조의 오류전파의 영향으로 생각된다.

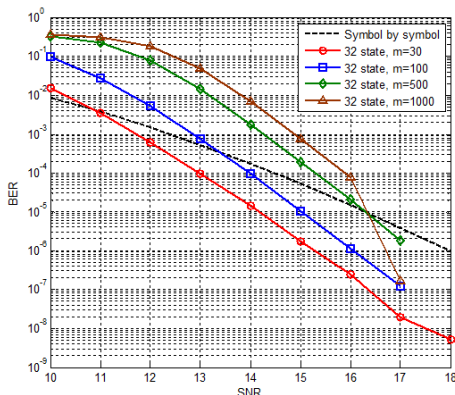


Fig. 2. BER of the proposed scheme according to m value

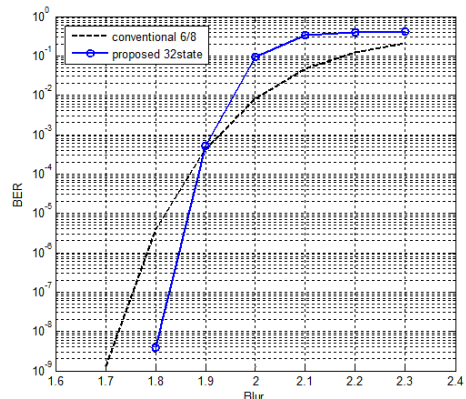


Fig. 3. BER of the proposed scheme according to blur

IV. 결 론

본 논문은 균형부호의 특성을 이용하여 IPI를 완화시키는 동시에 트렐리스 인코딩 구조를 이용하여 오류정정이 가능한 변조 방법을 제안하였다. 제안된 인코딩 방법은 SNR이 증가할수록 일반적인 6/8 균형부호보다 더 좋은 성능을 냈으며, blur가 1.9 이하일 때 더 성능이 우수하게 나타났다. 이것은 트렐리스 구조에 의해 생길 수 있는 오류전파가 발생하지 않는 정도의 채널 상태가 유지되는 환경에서 제안된 인코딩 방법이 더 좋은 성능을 보장하는 것을 의미한다.

References

[1] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Gunter, R. M. Macfalane, and G. T. Sincerbox, "Pixel matched holographic data storage with megabit pages," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 19, pp. 1509-1511, 1997.

[2] D. Psaltis, A. Pu, M. Levene, K. Curtis, and G. Barbastathis, "Holographic storage using shift multiplexing," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 782-784, 1995.

[3] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," in *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, 2004.

[4] V. Vadde and B. V. K. V. Kumar, "Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 20, pp. 4374-4386, 1999.

[5] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," in *Proc. SPIE*, vol. 4090, pp. 205-210, 2000.

[6] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," in *Proc. SPIE*, vol. 4342, pp. 393-400, Jan. 2002.

[7] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional non-isolated pixel modulation code for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 34, no. 2, pp. 163-168. Feb. 2009.

[8] J. Kim and J. Lee, "Performance of two-dimensional soft output Viterbi algorithm for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 37, no. 10, pp. 815-820. Oct. 2012

[9] G. Kim and J. Lee, "2/3 modulation code and its Viterbi decoder for 4-level holographic data storage," *J. KICS*, vol. 38, no. 10, pp. 827-832, Oct. 2013.

[10] G. Yang, J. Kim, and J. Lee, "Mis-alignment channel performance of error correcting 4/6 modulation code for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 971-976. Dec. 2010.

[11] G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, O. K. Greygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and B. Marcus, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 639-641, 1997.

김 병 선 (Byungsun Kim)



2012년 2월 : 정보통신공학과 학사
 2012년 9월~현재 : 숭실대학교
 정보통신공학과 석사 재학 중
 <관심분야> 스토리지 시스템,
 오류정정부호, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee)
 (2014년 9월호 참조)